بررسی آزمایشگاهی اثر هوادهی به جت‌های قائم بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی*

بابک لشکرآرا (۱)   علی لشکرآرا (۲)   منوچهر فتحی مقدم (۳)

چکیده عموماً مطالعات پیرامون آبشستگی توسط مدل‌های فیزیکی انجام می‌شود. تحقیقات نشان داده‌است که میزان هوای ورودی به جت خروجی از سرریزها در مدل کمتر از اصل است. لذا تأثیر هوادهی بر حفره‌ی آبشستگی نیازمند مطالعه می‌باشد. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی نظیر میزان اختلاط هوا و عمق پایاب بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی ناشی از جت‌های قائم مستغرق پرداخته شده است.حفره‌ی آبشستگی که تحت شرایط هوادهی و بدون‌هوادهی ایجاد شده، تحت شرایط هیدرولیکی یکسان از قبیل سرعت جت و عمق پایاب مورد مقایسه قرار گرفته است. پروفیل حفره‌ی آبشستگی تحت شرایط یکسان قطر ذرات مصالح بستر و عمق پایاب اساساً به عمق آبشستگی وابسته است. تحقیق حاضر نشان داد که غلظت هوا در میزان ابعاد حفره آبشستگی مؤثر است و عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. از بررسی روند تغییرات حداکثر عمق و طول نسبی آبشستگی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های قائم پیش هوادهی‌شده در حوضچه‌ی استغراق ملاحظه گردید که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد. این میزان تغییرات در ابعاد حفره‌ی آبشستگی دارای آستانه‌ی حدی می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای اعداد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۸/۷۸ ، در صورتی‌که میزان غلظت هوای وارد به جت کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد باشد، تأثیری بر میزان حداکثر عمق نسبی حفره‌ی آبشستگی مشاهده نمی‌گردد. هم‌چنین به‌ازای عدد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۸/٤٥ ، چنانچه میزان غلظت هوای وارد به جت کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد باشد اثری بر حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبشستگی مشاهده نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی : جت پیش هوادهی، نازل، آبشستگی، عدد فرود پایاب.

Experimental Investigation of the Effect of Air Entrained on the Vertical Jet Scour Hole

B. Lashkar-Ara   A. Lashkar-Ara   M. Fathi Moghadam

Abstract *Many experimental studies have been conducted on development of the scour hole as a result of vertical jet impaction. Research has shown that aeration of the nappe flow in the model is much weaker than that in the prototype. Therefore, the influence of aeration on scour holes needs further study. Experimental investigation of the effects of air entrainment and tail water depth on the scour hole developed by a vertical submerged jet impaction is carried out in this study. The scour holes with and without air entraining conditions were investigated while hydraulic parameters like jet velocity and tail-water depth were kept constant. The results showed that air entrainment effectively reduces the scour depth and dimension. Variation of maximum relative depth and length of scouring i.e. d_s/h_{tw} and L_s/h_{tw} versus tail-water Froude number parameter, i.e. Fr_{tw} were analyzed. By increasing the air concentration, maximum relative depth and length of scour hole reduced. The changes in scour hole dimension has a threshold. Results indicated that for Fr_{tw} more than 8.78, no meaningful effect on maximum scour hole depth (d_s/h_{tw}) and length (L_s/h_{tw}) was seen for air concentration of less than 3.25 percent.*

Keywords pre-air entrained jet, nozzle, scour, tail-water Froude number.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن۹۳/۱۲/٦ می باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

(۳) استاد، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

چگونگی تخلیه‌ی سیلاب سدهای بزرگ و نحوه‌ی انتقال آب به دره‌ی پایین‌دست و نیز استهلاک انرژی در برخی از سازه‌های پایانی از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از این سازه‌های پایانی در جهت استهلاک انرژی، حوضچه‌ی استغراق می‌باشد. به‌طور کلی فرآیند استهلاک انرژی در حوضچه‌ی استغراق از طریق تلاطم رخ می‌دهد. میزان انرژی جت آب خروجی از سدهای بزرگ که به حوضچه‌ی استغراق برخورد می‌نماید به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع ریزش، ضخامت جریان جت و هم‌چنین شرایط محیطی بستگی دارد. مطالعه‌ی رفتار جت آب در اتمسفر و حوضچه‌ی استغراق به مشخصه‌ی جریان جت از جمله تجزیه، فرآیند هواگیری و نحوه‌ی پخش جت، تأثیر نیروی کشش سطحی و انرژی جنبشی در تجزیه‌ی جت، عمق پایاب و پتانسیل فرسایندگی مصالح بستر بستگی دارد. آبشستگی ناشی از برخورد جت با بستر فرسایش‌پذیر را می‌توان با توجه به نوع جت به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی نمود. در این میان می‌توان به آبشستگی ناشی از جت‌های عمودی، جت‌های افقی و جت‌های پرتابی اشاره نمود. از طرفی با توجه به موقعیت استقرار جت نسبت به سطح پایاب می‌توان جت‌های مذکور را در گروه‌های جت مستغرق، جت آزاد، جت با ارتفاع ریزش زیاد، جت با ارتفاع ریزش کم، جت هوادهی شده و جت هوادهی نشده تقسیم‌بندی نمود.

فرسایش موضعی کف حوضچه‌های استغراق با بستر آبرفتی، پدیده‌ای پیچیده است و تخمین مشخصات هندسی حفره‌ی آبشستگی ایجاد شده دشوار است. تحقیقات نشان داده است که پس از اصابت جت با سطح بستر، بخشی از رسوبات معلق می‌شود و شروع به حرکت می‌نمایند. طی فاز تکوین و تشکیل پروفیل فرسایش عمل انتقال موضعی رسوبات تا برقراری تعادل جرمی بین ذرات انتقال‌یافته و ته‌نشین شده‌ی درون حفره ادامه می‌یابد تا حفره شکل پایدار و نهایی خود را پیدا نماید.

از آن‌جایی‌که جریان خروجی از سرریز سدهای بلند در طی مسیر به‌واسطه‌ی اغتشاش جت با هوای اطراف مخلوط می‌شود و سپس با زاویه‌ای تقریباً قائم به سطح حوضچه‌ی استغراق برخورد می‌نماید. تحقیقات نشان داده است که میزان هوای ورودی به جت خروجی از سرریزها در مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از میزان آن در اصل می‌باشد. لذا تأثیر هوادهی بر حفره‌ی آبشستگی نیازمند مطالعه می‌باشد.

تحقیقات وسیعی توسط محققان مختلف برای تعیین مشخصات آبشستگی موضعی حول سازه‌های هیدرولیکی انجام گرفته‌است و در اکثر موارد نتایج به‌صورت معادلات تجربی ارائه شده‌است. راس (۱۹۴۰) تغییرات ابعاد حفره‌ی آبشستگی با گذشت زمان از شروع تا تعادل نهایی را بررسی نمود. بورمن و ژولین (۱۹۹۱) با بررسی جت وارد به حفره‌ی آبشستگی معادلاتی برای ابعاد حفره‌ی فرسایشی ارائه نمودند. رابینسون و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی پیچیدگی‌های تنش برشی جریان درون حفره‌ی آبشستگی پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده توسط کلارک (۱۹۶۲) روی جت عمودی از نوع استوانه‌ای مستغرق خروجی از یک روزنه نشان می‌دهد که اثر ارتفاع ریزش H وابسته به فشار دینامیکی جت می‌باشد به‌طوری که در فشارهای زیاد اثر ارتفاع ریزش ناچیز می‌باشد و برعکس در فشارهای کم اثر H محسوس می‌باشد [1].

میسون (۱۹۸۹) با جمع‌آوری روابط تجربی محققان پیشین دریافت که درصد هوای وارد به جت می‌تواند بر عمق حفره‌ی آبشستگی مؤثر باشد. میسون با ارائه‌ی رابطه‌ی (۱) توانست میزان عمق آبشستگی را با احتساب هوای وارد به جت تخمین بزند.

$$d_s = 3.39\, q^{0.06} (1+\beta)^{0.3}\, h_{tw}^{0.16} / (g^{0.3}\, D^{0.06}) \qquad (۱)$$

که در آن d_s عمق آبشستگی؛ q دبی در واحد عرض، h_{tw} عمق پایاب، g شتاب ثقل، D اندازه‌ی

متوسط مواد بستر و β نسبت هوا به آب می‌باشد که توسط اروین (۱۹۷۶) پیشنهاد شده است [2]. در رابطه‌ی (۱) β به عنوان فاکتوری برای تعریف فرآیند آبشستگی جایگزین H ارتفاع سقوط جت شده است و از رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود.

$$\beta = 0.13\left(1 - v_e/v\right)\left(H/t\right)^{0.466} \qquad (۲)$$

که در آن t ضخامت جت به‌هنگام برخورد با حوضچه‌ی استغراق، v سرعت برخورد جت و v_e حداقل سرعت مورد نیاز جت برای ورود هوا می‌باشد. براساس مطالعات بین (۱۹۸٤) و وان د ساندل (۱۹۸۱) رابطه‌ی (۲) مناسب جت‌های دایره‌ای نیست و بیشتر در جت‌های تیغه‌ای و مستطیلی کاربرد دارد [۳ و٤]. اروین (۱۹۷۶) در تحقیقات خود مقدار v_e در رابطه‌ی (۲) را معادل ۱/۱ متر بر ثانیه توصیه نمود.

بورر و همکاران (۱۹۹۸) روند کاهشی سرعت جت ریزشی در حوضچه استغراق را بررسی کردند. آنان در تحقیقات خود دو نوع جت را در حالت با هوای ورودی و بدون هوای ورودی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که هوادهی، سرعت جت آب را کاهش می‌دهد [5]. کانپا و هگر در سال (۲۰۰۳)، تأثیر برهم‌کنش آب و هوا بر روی آبشستگی را مطالعه کردند و نشان دادند که با هوادهی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [6].

زو و همکاران (۲۰۰٤) اثرات هوادهی بر روی آبشستگی ناشی از جت ریزشی را مورد آزمایش قرار دادند و یک رابطه‌ی کمی بین غلظت هوای جت و عمق آبشستگی نسبی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که هوادهی روی شکل حفره‌ی آبشستگی اثر می‌گذارد و اساساً عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد [7].

ارمغانی (۱۳۹۲) با تغییر در زاویه‌ی جت از ٤۵ الی ۷۵ درجه و با تغییر در میزان هوای وارد به جت از صفر تا ۲۵ درصد نسبت به تحلیل تغییرات حفره‌ی آبشستگی اقدام نمود. وی نشان داد که با کم شدن زاویه‌ی جت ابعاد حفره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد. از طرفی تحقیقات نشان داد که غلظت هوای وارد به جت‌های پیش‌هوادهی‌شده به‌ازای مقادیر بیشتر از ۲۵ درصد اثری بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی نخواهد داشت[8].

هدف از انجام این تحقیق معرفی رابطه‌ی عمومی برای تخمین ابعاد حفره‌ی آبشستگی، تحت اثر جت‌های قائم پیش هوادهی شده می‌باشد.

روش تحقیق

به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان عمق پایاب و میزان هوای وارد به جت قائم بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی در حوضچه‌ی استغراق، ساخت یک مدل فیزیکی مناسب در دستور کار تحقیق قرار گرفت. مدل فیزیکی مورد نظر از قابلیت تزریق هوا به جت، تغییر مکان نازل و تغییر در میزان عمق پایاب برخوردار است.

به‌منظور شبیه‌سازی حوضچه‌ی استغراق از یک مخزن با طول ۲ متر، عرض ۱ متر و عمق یک متر استفاده گردید. شکل (۱) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. جریان آب از طریق یک لوله با قطر ٤ اینچ با مقطع دایره‌ای به‌سمت نازل با قطر ۲۵ میلی‌متر انتقال می‌یابد. سیستم افشانک به‌گونه‌ای طراحی گردیده‌است تا قبل از این‌که دبی آب از نازل خارج شود، هوای ورودی به نازل با آب مخلوط شود. میزان دبی هوای ورودی به افشانک با استفاده از یک لوله‌ی ونتوری که مجهز به یک ترانسدیوسر تفاضلی است اندازه‌گیری گردید. دبی آب به‌وسیله‌ی یک کنتور الکترومغناطیس با دقت مضاعف اندازه‌گیری شد.

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط یک جت‌های قائم، زاویه‌ی ارابه‌ی نازل در حالت ۹۰ درجه تنظیم گردید. رسوبات مورد استفاده شامل مصالح آبرفتی رودخانه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت σ=۱/۲۶ و با D_{50} معادل ۱۱/۱ میلی‌متر می‌باشد. چگالی ذرات رسوب معادل ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. عمق پایاب در

سه سناریوی مختلف به‌ترتیب برابر ۰/۳۲۵ ، ۰/۳۸۵، ۰/٤۳۵ متر تغییر نمود. دبی آب خروجی از نازل از ۳/۹۵ الی ٦/۱۲ لیتر بر ثانیه تغییر یافت. دبی هوا نیز از صفر تا ۱/۹۱ لیتر بر ثانیه نمو نمود که این امر منجر به تجربه‌ی غلظت هوای ورودی به نازل از صفر تا ٢٦ درصد گردید. دماغه‌ی نازل حدود یک سانتی‌متر مستغرق گردید تا با این عمل از ورود هوای اطراف به جت جریان جلوگیری گردد. زیرا امکان اندازه‌گیری هوای وارد به جریان مخلوط آب و هوای خروجی از نازل وجود نداشت. با این عمل تا حد چشم‌گیری از میزان خطای ورود هوا از اطراف به جت خروجی از نازل کاسته شد.

به‌منظور تعیین زمان انجام آزمایش‌ها در هر یک از سناریوهای تدوین شده مربوط به رقوم پایاب، دو آزمایش شاهد تحت شرایط جت هوادهی نشده و با ثبت تغییرات لحظه‌ای عمق آبشستگی به اجرا در آمد. نتایج حاکی از آن بود که به‌طور متوسط پس از گذشت تقریباً ۳۰۰ دقیقه تغییرات عمق آبشستگی محسوس نمی‌باشد، لذا زمان آزمایش‌ها برابر ٥ ساعت در نظر گرفته شده‌است. پس از سپری شدن زمان مذکور در هریک از آزمایش‌ها و خروج جریان آب از حوضچه‌ی استغراق، پروفیل آبشستگی تشکیل شده با استفاده از یک‌دستگاه متر لیزری مدل Leica Disto D8 برداشت گردید و سپس با استفاده از پروفیل مربوط مشخصات چاله‌ی آبشستگی استخراج شد. در شکل(۱) پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره‌ی آبشستگی نشان داده شده‌اند.

جهت تعیین رابطه‌ی میان پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی و یافتن تابع حاکم بر فضای نگاشت آنها، از تئوری باکینگهام π استفاده گردید. برای این منظور ابعاد حفره‌ی آبشستگی $(d_s\ ,\ L_s)$ به‌عنوان متغیرهای وابسته، و پارامترهای مستقل مؤثر بر این پدیده شامل Q_w دبی خروجی از نازل، Q_a دبی هوا، d_n قطر نازل، V_o سرعت متوسط جریان مخلوط آب و هوای خروجی از نازل، B عرض مخزن، D_{50} قطر متوسط ذرات، g شتاب ثقل، μ لزوجت سیال، ρ_w وزن مخصوص آب، ρ_s وزن مخصوص ذرات رسوب در نظر گرفته شدند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f\left(Q_w, Q_a, d_n, V_o, B, h_{tw}, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s\right) = 0 \quad (۳)$$

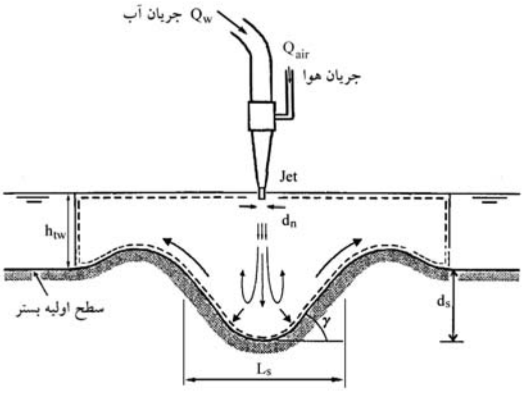
با استفاده از تئوری باکینگهام π و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ, g, h به‌عنوان متغیرهای تکراری، و حذف پارامترهای ثابت هم‌چون قطر ذرات رسوب D_{50}، قطر نازل d_n، عرض مخزن B و وزن مخصوص ذرات رسوبی ρ_s، معادلات بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی ناشی از جت در حوضچه‌ی استغراق را می‌توان به‌صورت روابط (٤) و (٥) نوشت:

$$d_s/h_{tw} = f(V_o/\sqrt{g\,h_{tw}}\ , \rho_w\ V_o\ h_{tw}/\mu, C_a) \quad (٤)$$

$$L_s/h_{tw} = f(V_o/\sqrt{g\,h_{tw}}\ , \rho_w\ V_o\ h_{tw}/\mu, C_a) \quad (٥)$$

پارامتر C_a معرف غلظت هوای وارد به جت می‌باشد و از رابطه‌ی $C_a = \left(Q_{air}/Q_w + Q_{air}\right) \times 100$ تقریب زده می‌شود.

پارامترهای اول و دوم ظاهر شده در معادلات (٤) و (٥) به‌ترتیب معرف اعداد فرود و رینولدز می‌باشند.



شکل ۱ پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره‌ی آبشستگی

از آن‌جایی‌که جریان تحت فشار زیاد و کاملاً متلاطم با عدد رینولدز ۲۰۳۰۰۰ الی ٤۰۰۰۰۰ از نازل خارج می‌شود، لذا می‌توان از اثر عدد رینولدز

چشم‌پوشی نمود. پارامتر $V_o/\sqrt{g\,h_{tw}}$ که از جنس عدد فرود می‌باشد، معرف میزان نیروی درگ وارد به ذرات رسوبی است و در ادامه‌ی تحقیق تحت عنوان عدد فرود پایاب Fr_{tw} نامیده شده‌است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که محدوده‌ی تغییرات عدد فرود پایاب در طول تحقیق حاضر از ۳/۹۸ الی ۸/۹۹ تغییر یافته‌است.

در نهایت معادلات حاکم بر فضای تحقیق را می‌توان به‌صورت معادلات (٦) و (٧) نمایش داد.

$$d_s/h_{tw} = f(Fr_{tw}, C_a) \quad (٦)$$

$$L_s/h_{tw} = f(Fr_{tw}, C_a) \quad (٧)$$

پس از تعیین فرم عمومی معادلات حاکم بر فضای تحقیق، لازم است تا روند تغییر پارامترهای مستقل ارزیابی گردند. برای این منظور لازم است تا تجزیه و تحلیل آماری صورت پذیرد. توابع خطای مهمی که به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از معادلات پیشنهادی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند به‌شرح زیر می‌باشند.

میانگین خطای مطلق

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|O_i - P_i\right| \quad (٨)$$

ریشه‌ی میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (٩)$$

ضریب وزن باقی‌مانده

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (١٠)$$

ضریب هم‌بستگی

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (١١)$$

که در این روابط O نشانگر پارامتر مشاهده شده، P نشانگر پارامتر پیش‌بینی‌شده و $\bar{O}$ متوسط پارامترهای مشاهداتی و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

آزمایش‌ها در دو سناریوی کلی جت‌های هوادهی شده و هوادهی نشده به اجرا در آمدند. در این دو سناریو جت‌های با هوادهی و بدون هوادهی تحت شرایط سرعت جریان خروجی از نازل و عمق پایاب یکسان و هم‌چنین مخلوط دبی آب و هوای متغیر، مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش‌ها و ترسیم پروفیل طولی بستر در حالات مختلفِ غلظت هوای وارد به نازل، اختلاف بین حفره‌های ایجاد شده با جت هوادهی شده و هوادهی نشده به‌وضوح قابل‌مشاهده بود.

برای به‌دست آوردن میزان کمیت اثر هوای ورودی به جت بر میزان ابعاد حفره‌ی آبشستگی، نحوه‌ی تغییرات اعماق آبشستگی نسبی d_s/d_{so} و طول آبشستگی نسبی L_s/L_{so} در مقابل غلظت هوای جت C_a، ترسیم گردیدند (شکل‌های ۲ و ۳). در نسبت‌های بدون بعد اخیر پارامتر d_s و d_{so} به‌ترتیب معرف عمق حفره‌ی آبشستگی ایجادشده بر اثر هوادهی و بدون هوادهی می‌باشند که از سطح اولیه‌ی بستر سنجیده شده‌اند.

برای استخراج روابط حاکم بر فضای تحقیق و بررسی چگونگی تغییر آهنگ پارامترهای d_s/d_{so} و L_s/L_{so} در مقابل C_a، با حفظ اثر عمق پایاب و تغییر در میزان سرعت جریان خروجی از نازل، داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. برای این منظور از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی استفاده گردید تا امکان سنجش قابلیت اعتماد روابط معرفی شده با استفاده از ۲۰ درصد نتایج مشاهداتی باقی‌مانده میسر گردد. قابل ذکر است که داده‌های مورد استفاده در مرحله‌ی صحت‌سنجی هیچ نقشی در تعیین ضرایب معادلات معرفی‌شده نداشته‌اند.

نتایج توسط روابط (۱۲) و (۱۳) ارائه شده‌اند.

$$d_s/d_{so} = \left(1 - C_a/100\right)^{3.758} \quad (۱۲)$$

$$L_s/L_{so} = \left(1 - C_a/100\right)^{2.407} \quad (۱۳)$$

نحوه‌ی برازش روابط (۱۲) و (۱۳) از بین نتایج مشاهداتی در شکل‌های (۲و۳) نمایش داده شده‌اند.

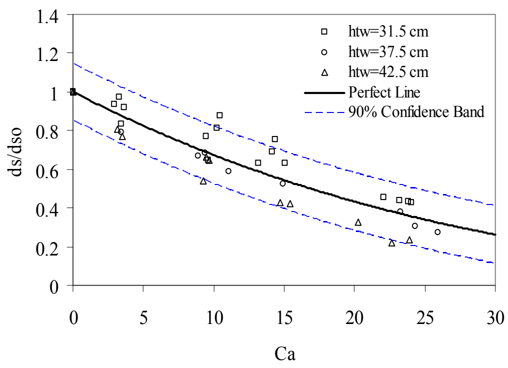
با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و به‌کارگیری توابع خطای معرفی‌شده در بخش روش تحقیق، پارامترهای خطای حاصل از به‌کارگیری روابط (۱۲) و (۱۳) در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱ تحلیل آماری خطای روابط (۱۲) و (۱۳)

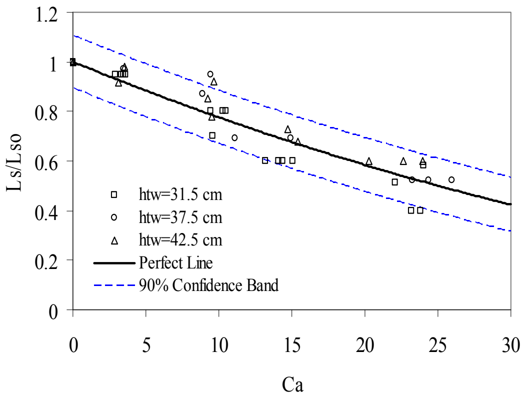
پارامتر	d_s/d_{so}	L_s/L_{so}
میانگین خطای مطلق MAE	۰/۰۲۰۲	۰/۰۱٤٦
ریشه‌ی میانگین مربعات خطا RMSE	۰/۰۵۰۷	۰/۰۳۵۹
ضریب وزن باقیمانده CRM	−۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷۷
ضریب همبستگی R^2	۰/۸۷۷	۰/۸۹۳

به‌منظور صحت‌سنجی روابط (۱۲) و (۱۳) در تخمین عمق و طول نسبی حفره‌ی آبشستگی، از ۲۰ درصدِ باقی‌مانده‌ِ داده‌های مشاهداتی که در تعیین ضرایب روابط مذکور مشارکت نداشته‌اند استفاده گردید. نتایج حاصل از این صحت‌سنجی در شکل‌های ٤ و ۵ نمایش داده شده‌اند. ضریب زاویه‌ی خط برازش داده شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد که روابط (۱۲) و (۱۳) با متوسط خطای ۲-٪ قادرند تا پارامترهای d_s/d_{so} و L_s/L_{so} را پیش‌بینی نمایند.

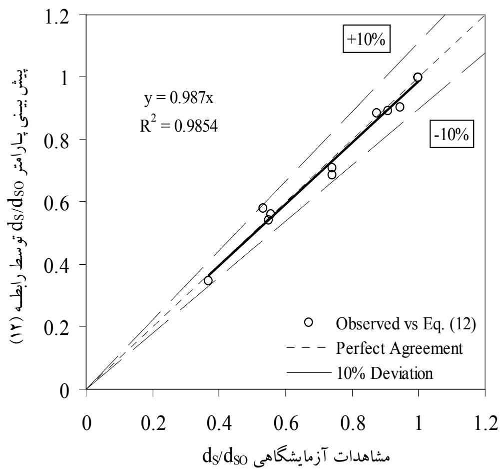
هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان تغییرات ابعاد حفره‌ی آبشستگی حداکثر در مقابل عدد فرود پایاب به‌ازای تغییر در میزان هوای تزریق شده به جریان خروجی از نازل می‌باشد. برای این منظور داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق با توجه به سناریوهای از پیش تعیین‌شده ترسیم گردیدند.



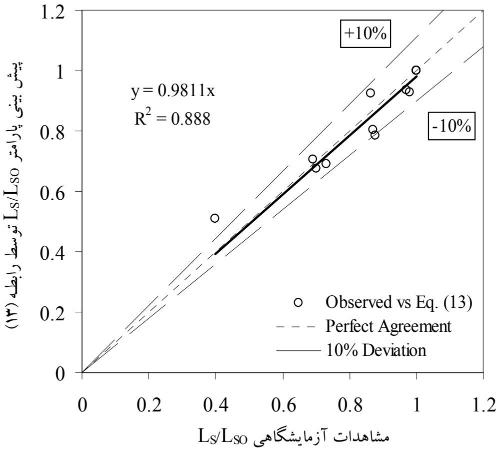
شکل ۲ طول نسبی آبشستگی d_s/d_{so} در مقابل غلظت هوای ورودی به جت C_a در سناریوهای مختلف عمق پایاب



شکل ۳ طول نسبی آبشستگی L_s/L_{so} در مقابل غلظت هوای ورودی به جت C_a در سناریوهای مختلف عمق پایاب



شکل ٤ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱۲) در تخمین d_s/d_{so}



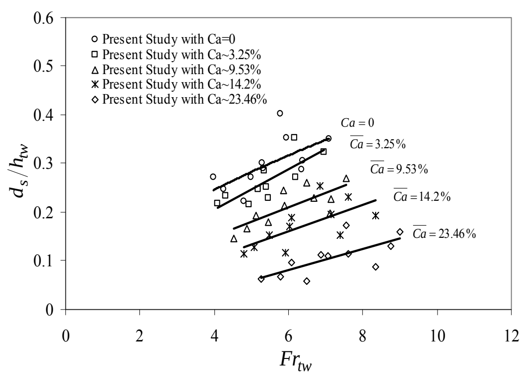
شکل ۵ صحت سنجی معادله‌ی (۱۳) در تخمین L_s/L_{so}

شکل (٦) نحوه‌ی تغییر حداکثر عمق نسبی آبشستگی در مقابل عدد فرود پایاب را به‌ازای مقادیر مختلف غلظت هوای ورودی به جت نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که امکان برازش منحنی‌های با غلظت هوای ورودی صفر ، ۹/۵۳ ، ۱٤/۲، ۲۳/٤٦ درصد امکان‌پذیر است.

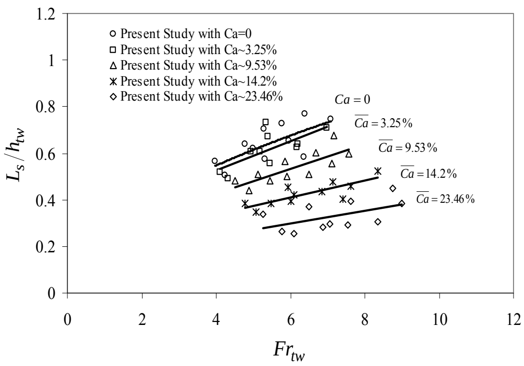
به‌طور مشابه نحوه‌ی تغییرات حداکثر طول نسبی آبشستگی در مقابل تغییرات عدد فرود پایاب و میزان هوای وارد به جت، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.

از تحلیل شکل (٦) می‌توان دریافت که به ازای عدد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۹ و تحت شرایط عمق پایاب یکسان چنان‌چه میزان هوای وارد به جت کمتر از ۳/۲۵ درصد باشد، میزان هوای وارد به جت بر عمق حفره‌ی آبشستگی بی‌تأثیر خواهد بود. این موضوع بدین معنی است که به‌ازای عدد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۹ میزان هوای وارد با غلظت متوسط ۳/۲۵ درصد، اثری بر حداکثر عمق نسبی آبشستگی نخواهد داشت و مغزه‌ی جت با این میزان هوا در شرایط هیدرولیکی یاد شده متلاشی نشده و با برخورد به سطح بستر مصالح باعث فراهم آوردن شرایط آبشستگی مشابه شرایط بدون ورود هوا به نازل می‌باشد. ارزیابی‌های صورت گرفته بر روی حداکثر طول نسبی آبشستگی L_s/h_{tw} به‌ازای میزان هوای ورودی با غلظت متوسط ۳/۲۵ درصد، اثری مشابه حداکثر عمق نسبی آبشستگی را در پی خواهد داشت. با این تفاوت که حذف اثر میزان هوای وارد به جت در عدد فرود پایاب ۸/۵ رخ خواهد داد. هم‌چنین شکل (٦) گویای این مطلب است که با افزایش میزان غلظت هوای ورودی به جت، حداکثر عمق نسبی آبشستگی به‌صورت نسبی کاهش می‌یابد و این امر به‌علت متلاشی شدن مغزه‌ی جت می‌باشد. در یک تخمین دقیق‌تر می‌توان چنین ادعا نمود که با تزریق حدود ۲۳ درصد هوا به جت خروجی از نازل در شرایط یکسان عدد فرود پایاب، میزان حداکثر عمق نسبی آبشستگی حدود ٦۷ درصد کاهش می‌یابد. ارزیابی‌های مشابه صورت گرفته بر روی شکل ۷ گویای این مطلب است که با تزریق حدود ۲۳ درصد هوا به جت خروجی از نازل، حداکثر طول نسبی آبشستگی به‌طور متوسط ۵۵ درصد نسبت به شرایط مشابه جت بدون هوادهی کاهش می‌یابد.

به‌منظور معرفی روابط عمومی حاکم بر فضای تحقیق، مطابق با نتایج حاصل از بخش آنالیز ابعادی، از نرم‌افزار SPSS بهره‌گیری شد.



شکل ٦ تغییرات حداکثر عمق نسبی آبشستگی d_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} به‌ازای تغییر در میزان هوای وارد به جت C_a



شکل ۷ تغییرات حداکثر طول نسبی آبشستگی L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} به‌ازای تغییر در میزان هوای وارد به جت C_a

بـه‌منظـور حصـول اطمینـان از عملکـرد روابـط پیشنهادی لازم است تا نتـایج حاصـل از تخمـین ایـن روابط با نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی محققان دیگر مورد ارزیـابی قـرار گیـرد. براسـاس جسـتجوی به‌عمل آمده در مراجع معتبر علمی، مطالعـات مشـابهی که در آن وضعیت گسترش حفره‌ی آبشستگی تحت اثر جت‌های هوادهی شده قائم مورد مطالعـه قـرار گرفتـه باشد، یافت نگردید. لذا تعیین روابط حاکم بـر فضـای تحقیق با استفاده از ۸۰ درصد داده‌هـای مشـاهداتی در همین تحقیق تعیـین گردیـد تـا امکـان صـحت‌سـنجی روابط معرفی شده با ۲۰ درصـد داده‌هـای بـاقی‌مانـده میسـر باشـد. معـادلات (۱٤) و (۱۵) معـرف روابـط عمومی حاکم بر فضای تحقیق می‌باشند.

$$d_s/h_{tw} = 0.0719\left(1 - C_a/100\right)^{4.51} Fr_{tw}^{\ 0.8446} \qquad (۱٤)$$

$$L_s/h_{tw} = 0.2934\left(1 - C_a/100\right)^{3.1112} Fr_{tw}^{\ 0.486} \qquad (۱۵)$$

روابـط (۱٤) و (۱۵) در محـدوده‌ی عـدد فـرود پایاب $4 < Fr_{tw} < 9$ و غلظـت هـوای $0 < C_a < 26$ معتبـر است.

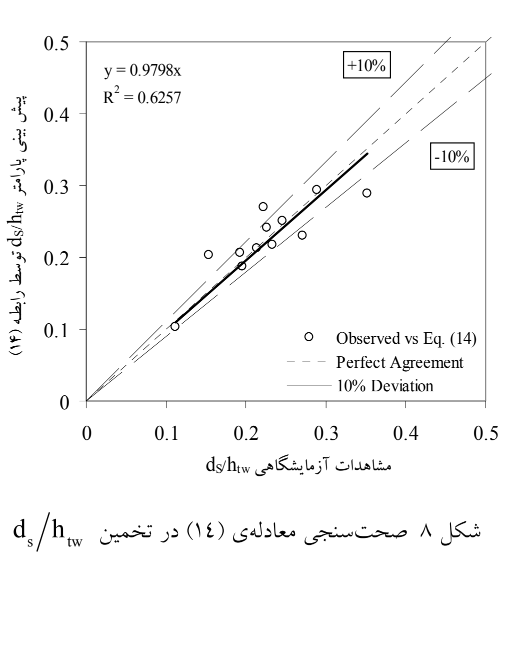
به‌منظـور ارزیـابی دقـت روابـط (۱٤) و (۱۵) از توابع میانگین خطای مطلق، ریشه‌ی میـانگین مربعـات خطـا، ضـریب وزن بـاقی‌مانـده و ضـریب همبسـتگی استفاده گردید. نتایج در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

جدول ۲ تحلیل آماری خطای روابط (۱۰) و (۱۱)

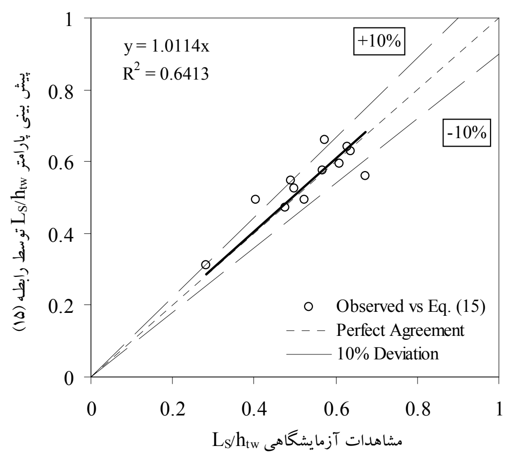
پارامتر	d_s/h_{tw}	L_s/h_{tw}
میانگین خطای مطلق MAE	۰/۰۰۷۸	۰/۰۱۱۱
ریشه‌ی میانگین مربعات خطا RMSE	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۳٦
ضریب وزن باقی‌مانده CRM	−۰/۰۰۲۹	−۰/۰۰۰۲
ضریب همبستگی R^2	۰/۸٦۱	۰/۸٦۹

در این مرحله از تحقیق با اسـتفاده از ۲۰ درصـد داده‌های مشاهداتی که نقشی در تعیین ضـرایب روابـط (۱٤) و (۱۵) نداشتند، نسبت به صـحت‌سـنجی روابـط مذکور اقدام گردید. نتایج حاصـل از مقایسـه‌ی مقـادیر مشـاهداتی پارامترهـای d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} در مقابـل مقـادیر پـیش‌بینـی شـده توسـط روابـط (۱٤) و (۱۵) به‌ترتیب در شکل‌های(۸ و ۹) نمایش داده شده‌اند.

ضـریب زاویـه‌ی خطـوط بـرازش شـده در شکل‌های (۸ و۹) نشان مـی‌دهنـد کـه روابـط عمـومی معرفی‌شـده قادرنـد تـا پارامترهـای نسـبی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} را به‌ترتیب به‌طـور متوسـط بـا دقـت ۰/۰۲- درصد و ۰/۰۱۱+ درصد تخمین بزنند.



شکل ۸ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱٤) در تخمین d_s/h_{tw}



شکل ۹ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱۵) در تخمین L_s/h_{tw}

همان‌طوری که از شرایط هیدرولیکی و فرضیات حاکم بر تحقیق مشهود است با افزایش عمق پایاب میزان عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش عدد فرود پایاب، میزان حداکثر عمق نسبی آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر با افزایش میزان هوای وارد به جت به‌ازای اعداد فرود پایاب یکسان، میزان حداکثر عمق نسبی آبشستگی روند کاهشی به خود می‌گیرد. این روند تا جایی پیش خواهد رفت که مغزه‌ی جت در اثر ورود هوا به آن کاملاً متلاشی شده و جت ورودی به حوضچه‌ی استغراق دیگر بیش از آن میزان حدی، قادر به فرسایش بستر نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

از بررسی روند تغییرات حداکثر عمق نسبی آبشستگی d_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های قائم پیش‌هوادهی شده در حوضچه‌ی استغراق (شکل ٦) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد.

هم‌چنین می‌توان دریافت که به‌ازای اعداد فرود پایاب Fr_{tw} بزرگ‌تر از ۸/۷۸ میزان هوای ورودی به نازل با غلظتی کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد تأثیری بر پارامتر d_s/h_{tw} نخواهد داشت.

از بررسی روند تغییرات حداکثر طول نسبی آبشستگی L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های پیش‌هوادهی شده در حوضچه‌ی استغراق (شکل ۷) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، آهنگ تغییرات پارامتر L_s/h_{tw} روند نزولی را در پیش می‌گیرد.

هم‌چنین می‌توان دریافت که به‌ازای اعداد فرود پایاب Fr_{tw} بزرگ‌تر از ۸/٤٥ ، میزان غلظت هوای ورودی به نازل کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد، تأثیری بر حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبشستگی نخواهد داشت. به‌ازای متوسط مقادیر درصد غلظت هوای ورودی به جت بین مقادیر $9.53<\bar{C}_a<23.46$ با افزایش هر یک درصد هوای وارد به جت به‌طور متوسط ٤/۳۸ درصد از حداکثر عمق نسبی آبشستگی کاسته خواهد شد. به‌طور مشابه به‌ازای افزایش میزان غلظت هوای ورودی به جت در محدوده‌ی مورد اشاره به‌طور متوسط ۳/۱۷ درصد از حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبشستگی کم می‌شود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که روابط معرفی‌شده در تحقیق حاضر برای تخمین حداکثر عمق نسبی حفره‌ی آبشستگی d_s/d_{so} و حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبشستگی L_s/L_{so} قادرند تا به‌طور متوسط با خطای ۰/۰۲- درصد و ۰/۰۱۱+ درصد پارامترهای d_s/d_{so} و L_s/L_{so} را پیش‌بینی نمایند.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول به پاس فراهم آوردن امکان استفاده از زمایشگاه مدل‌های و مهندسی رودخانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

1. Mason, P.J. "Effect of air entrainment on plunge Pool Scour.", *Journal of Hydraulic Engineering*., ASCE, Vol 115, No. 3, pp. 385-399. (1989).
2. Ervine, D. A. "The entrainment of air in water." *Institute of Water Power and Dam Construction*., 28(12), 27-30. (1976).
3. Bin, A. K. "Air entrainment by plunging liquid jets." presented at the Sept. 3-6, IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, held at Esslingen, Germany.(1984).
4. Van de Sande, E. "Air entrainment by plunging water jets," thesis presented to the Technische Hogeschool, at Delft, The Netherlands, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, (1981).
5. Bohrer, J.G., Abt, S.R., and Wittler, R. J., "Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.10, Pp: 1043-1048. (1998).
6. Canepa, S. and Hager, W.H. "Effect of jet air content on plunge pool scour." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129. No. 5. Pp: 358-365. (2003).
7. Xu, W., Deng, J., Qu, J., Liu, S., and Wang, W., "Experimental Investigation on Influence of Aeration on Plane Jet Scour." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 2, February 1, 2004. ©ASCE, ISSN 0733-9429/2004/2- 160–164. (2004).

۸. ارمغانی، ا.، "بررسی آزمایشگاهی اثر جت پیش هوادهی شده بر عمق آبشستگی حوضچه استغراق." پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول (۱۳۹۲).

9. Rahrneyer, W. "The effect of aeration on scour." *Proceedings of 1990 American Society of Civil Engineers National Hydraulic Engineering Conference*, ASCE, New York, 531–536. (1990).
10. Aderibigbe, O.O., and Rajaratnam, N. "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets." *Journal of Hydraulic Research*, 34(1), 19–33., (1996).